تأثیر هم‌زمان ذرات Mg و SiC بر روی خواص کششی ماده‌ی مرکب هیبریدی Al-Mg-SiC تولید شده به‌روش اتصال نورد تجمّعی (ARB) *

شهلا ترابی[۱] حبیب دانش‌منش[۲] محمد محسن مشکسار[۳]

چکیده

فرایند اتصال نورد تجمّعی به‌عنوان یک روش تغییر شکل شدید برای تولید ورق‌های ماده‌ی مرکب با ریزساختار فوق ریزدانه مورد استفاده قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، از فرایند نورد تجمّعی به‌منظور بررسی هم‌زمان تأثیر ذرات Mg و SiC بر خواص کششی ماده‌ی مرکب هیبریدی Al-Mg-SiC استفاده شده است. ماده‌ی مرکب هیبریدی Al-Mg-SiC با مقادیر مختلفی از ذرات Mg و SiC با فرایند نورد تجمّعی ساخته شد و تغییرات خواص مکانیکی در حالت‌های مختلف توسط آزمون کشش اندازه‌گیری و بررسی شد. نتایج نشان دادند که با فزودن مخلوط ذرات Mg و SiC ، انعطاف‌پذیری و استحکام به‌طور هم‌زمان افزایش می‌یابند. افزون بر این، به‌ازای کسر حجمی ثابت ذرات، مواد مرکب Al-Mg-SiC از استحکام و انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به مواد مرکب Al-Mg و Al-SiC برخوردارند. بررسی‌های میکروسکپ الکترونی روبشی از سطوح شکست نمونه‌ها پس از آزمون کشش نشان دادند که سازوکار شکست در نمونه‌های ماده‌ی مرکب تولیدی در این تحقیق، از نوع شکست نرم برشی همراه با تشکیل فرورفتگی‌هایی کم‌عمق و کشیده بوده است.

واژه‌های کلیدی فرایند اتصال نورد تجمّعی، ماده‌ی مرکب هیبریدی، آزمون کشش، سطح شکست.

The Simultaneous Effects of Mg and SiC Particles on Tensile Properties of Al-Mg-SiC Hybrid Composite Produced By Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process

S. Torabi H. Danesh Manesh M. M. Moshksar

Abstrac

Accumulative Roll Bonding (ARB) process was used as a severe plastic deformation technique to produce aluminum composite sheets with ultrafine grain structure. In this study, the simultaneous effects of Mg and SiC particles as reinforcing constituents on tensile properties of Al-Mg-SiC hybrid composite have been studied. Al-Mg-SiC hybrid composite samples with different amounts of Mg and SiC were fabricated and the variation of their mechanical properties was examined by tensile test. Results showed a simultaneous increase in both the strength and ductility of composite samples with the addition of SiC and Mg particles. In addition, for the same volume fraction of particles, Al-Mg- SiC composites showed a higher strength and ductility as a comparison with Al-Mg and Al-Si composites. The examination of fracture surfaces of the tensile samples by scanning electron microscope showed a ductile shear fracture mode with shallow and elongated dimples formed on the fracture surfaces.

Keywords Accumulative roll bonding (ARB), Hybrid composite, Tensile test, Fracture surface.

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۱/۱۱/۲۹ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۲/۹/۱۰ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد شکل‌دهی فلزات، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه شیراز

(۲) دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه شیراز

(۳) استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه شیراز

مقدمه

مواد مرکب هیبریدی (ترکیبی) یکی از جدیدترین انواع مواد مرکب در حال توسعه می‌باشند. مواد مرکب هیبریدی به موادی گفته می‌شود که بیش از یک نوع فاز تقویت‌کننده یا بیش از یک نوع فاز زمینه و یا از هر دو نوع در آن وجود داشته باشد. این مواد مرکب با ترکیبات متفاوتی از صفحه‌های یکپارچه، ورق‌های نازک و یا ترکیبی از صفحه‌ها و ورق‌های نازک به‌همراه مواد مرکب الیافی، در کنار یک‌دیگر قرار می‌گیرند.

مواد مرکب هیبریدی از نقطه نظرات اقتصادی و فنّی بر دیگر مواد مرکب ارجحیّت دارند. یکی از دلایل ترکیبی (هیبرید) کردن مواد مرکب، بهبود مقاومت به ضربه با افزودن مقداری الیاف نرم به مواد مرکبی که با الیاف سخت مستحکم شده‌اند، می‌باشد. افزون بر این، کاهش وزنی که با استفاده از مواد هیبریدی به‌دست می‌آید دلیل دیگری برای هیبرید کردن مواد مرکب است. این کار در صنایع حمل و نقل و هوافضا که در آن‌ها بهینه‌سازی مصرف سوخت اهمیّت زیادی دارد، از ارزش بسیاری برخوردار است. یکی دیگر از نتایج هیبرید کردن مواد مرکب، مهار کردن آسیب‌های مکانیکی میکروسکُپی در آنهاست. هم‌چنین، با توجه به گستره‌ی وسیع انتخاب مواد برای هیبرید کردن مواد مرکب، امکان تولید ترکیب‌های بسیار متنوع با گستره‌ی وسیعی از خواص و ازران قیمت وجود دارد[۱].

در دهه‌های اخیر، استفاده از مواد مرکب زمینه آلومینیم به‌دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب، در کاربردهای مهندسی مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. از این‌رو، توسعه‌ی روش‌های جدید برای تولید این‌گونه از مواد مرکب اهمیّت یافته است. دانش فنّی تولید نقش مهمی در کیفیّت فصل مشترک بین ذرات و زمینه، نحوه‌ی توزیع ذرات و نوع عیب‌های ایجاد شده در ماده‌ی مرکب ایفا می‌کند. تاکنون، از روش‌های مختلفی برای تولید این مواد مرکب استفاده شده‌اند. از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به متالورژی پودر و ریخته‌گری اشاره کرد. در این فرایندها، رسیدن به خواص مطلوب با محدودیت‌هایی همراه است. افزون بر این، از این روش‌ها نمی‌توان به‌تنهایی برای تولید ورق‌های ماده‌ی مرکب استفاده کرد. در این موارد، به انجام عملیّات بعدی نیاز است و این عملیّات منجر به افزایش هزینه‌های تولید می‌شود [2,3].

در این راستا، محققان روش‌های متفاوتی را برای ساخت و تولید مواد نانوساختار ارائه کرده‌اند. یکی از روش‌های بسیار مرسوم، استفاده از روش تغییر شکل موم‌سان شدید (SPD) می‌باشد. در این روش، با اعمال تغییر شکل‌های زیاد در چند مرحله می‌توان اندازه‌ی دانه‌ی فلز را به‌ابعاد فوق ریز (با میانگین کم‌تر از ۱ میکرومتر) و یا حتی نانو (با میانگین کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر) رساند [4,5].

اخیراً، از فرایند اتصال نورد تجمعّی (Accumulative Roll Bonding) به‌عنوان یک روش تغییر شکل شدید برای ساخت ورق‌های ماده‌ی مرکب استفاده شده است. با توجه به ماهیّت این روش نسبت به روش‌های دیگر، تعداد عیب‌هایی مانند حفره‌ها کاهش می‌یابد و با شکسته شدن خوشه‌های ذرات، توزیع یکنواخت‌تری از آن‌ها در زمینه ایجاد می‌شود. افزون بر این، با بهبود استحکام فصل مشترک ذره و زمینه، خواص مکانیکی قابل قبولی حاصل می‌شود [٦].

بر اساس تحقیقات انجام شده توسط نویسندگان این حاضر، تحقیق منسجمی که در آن ماده‌ی مرکب هیبریدی Al-1%Vol Mg-1%VolSiC به‌روش نورد تجمعّی تولید و تأثیر هم‌زمان فلز منیزیم و SiC بررسی شده باشد، مشاهده نشده است. بنابراین، هدف از انجام تحقیق حاضر، پر کردن بخشی از خلأ موجود در تحقیقات در این زمینه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این تحقیق، ورق آلومینیم خالص

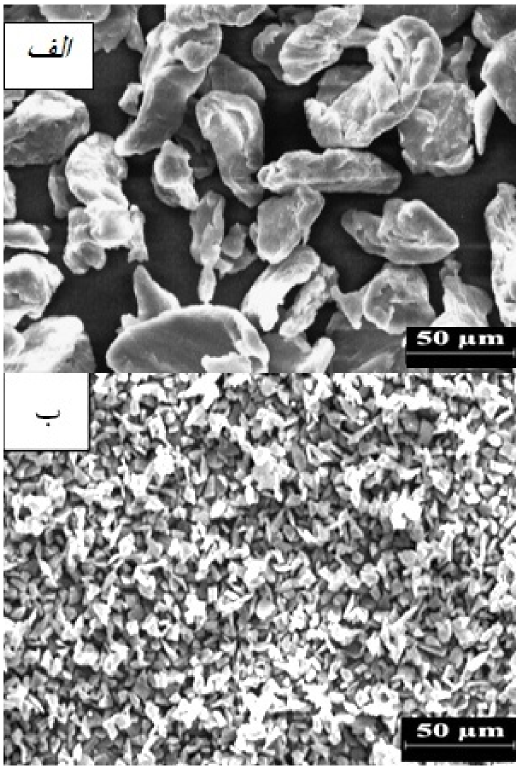
تجاری نوع ۱۰۵۰ به‌ضخامت ۰.۵ میلی‌متر با ترکیب نشان داده شده در جدول (۱)، پودر منیزیم با اندازه‌ی ذرات ۵۰ میکرومتر و پودر SiC با اندازه‌ی ذرات ۵ میکرومتر می‌باشند.

جدول۱ ترکیب شیمیایی آلومینیم ۱۰۵۰ استفاده شده در این تحقیق

عنصر	Mn	Cu	Bi	Fe	Si	Al
درصد وزنی	<۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۱	۰/۱۲	۰/۰۴	۹۹/۵

جدول ۲ خواص مکانیکی ورق آلومینیم تاب‌کاری شده که در این تحقیق از آن استفاده شده است

ازدیاد طول کل (%)	سختی (HV 0.025)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)
٤٣	٢٥	٢٤	٤٩.١٨



شکل ۱ تصویرهای میکروسکُپ الکترونی روبشی از پودر منیزیم (الف) و پودر SiC (ب).

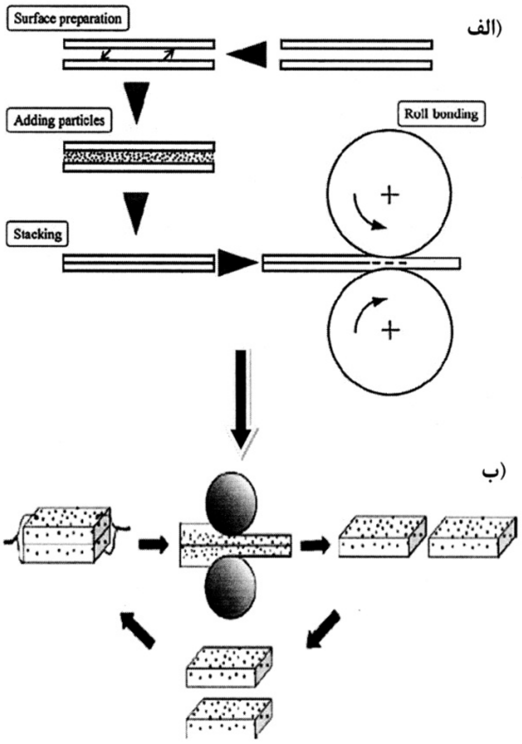
ابتدا ورق‌های آلومینیمی در دمای ۵۰۰ °C و به‌مدّت زمان ٦٠ دقیقه تاب‌کاری شدند. خواص مکانیکی ورق‌های تاب‌کاری شده در جدول (۲) آورده شده‌اند. در مرحله‌ی دوّم و به‌منظور اختلاط پودر منیزیم و SiC، میزان‌های مورد نظر از این مخلوط پودر به‌مدّت ۱ ساعت با سرعت ٤٠٠ دور در دقیقه و در محیط گاز آرگون آسیاکاری شدند. در شکل (۱)، تصویر میکروسکُپ الکترونی روبشی از مخلوط‌های پودر آسیاکاری شده نشان داده شده است. در نهایت، نمونه‌های ماده‌ی مرکب هیبریدی مطابق با شرایط ارائه شده در جدول (۳)، با فرایند نورد تجمّعی تولید شدند.

جدول ۳ نمونه‌های ماده‌ی مرکب هیبریدی ساخته شده در تحقیق حاضر

1	Al- 2Vol.%Mg
2	Al-1.5Vol.%Mg-0.5Vol.%SiC
3	Al-1Vol.%Mg-1Vol.%SiC
4	Al-0.5Vol.%Mg-1.5Vol.%SiC
5	Al-2Vol.%SiC

برای ساخت ماده‌ی مرکب و به‌منظور از بین بردن آلودگی‌ها و لایه‌های اکسیدی سطحی که مانع از ایجاد جوش سرد بین لایه‌های فلزی می‌شوند، ورق‌ها با اَستن شسته شدند و سپس، سطح آن‌ها با برس فولادی برس‌کاری شدند. پس از آن، میزان ۲ درصد حجمی از مخلوط پودر مورد نظر با استفاده از اَلک بین این دو ورق به‌شکلی یکنواخت پراکنده شد. به‌منظور جلوگیری از حرکت ورق‌ها، دو انتهای آن‌ها با سیم مسی به‌یک‌دیگر بسته شدند و ورق‌ها به‌منظور ایجاد جوش سرد مناسب، به‌میزان ٦٦ درصد نورد شدند (این مرحله به‌عنوان مرحله‌ی صفر از فرایند نام‌گذاری می‌شود). در نهایت، ورق نورد شده به دو نیمه بریده شدند و پس از آماده‌سازی سطحی، به‌میزان کاهش

سطح مقطع ۵۰ درصد نورد شدند. این‌کار تا ۸ مرحله تکرار شد. در شکل (۲)، طرح‌واره‌ای از فرایند نورد تجمّعی برای تولید این ماده‌ی مرکب نشان داده شده است. عمل نورد در دمای اتاق و بدون استفاده از روان‌کار با استفاده از دستگاه نورد آزمایشگاهی به‌ظرفیّت ۲۰ تن و غلتک‌هایی به‌قطر ۱۷۰ و طول ۱۱۰ میلی‌متر انجام شد.



شکل۲ طرح‌واره‌ای از فرایند نورد تجمّعی؛ الف) مرحله‌ی اوّل فرایند با اعمال ٦٦ درصد کاهش ضخامت، و ب) مرحله‌ی دوّم فرایند با اعمال ۵۰ درصد کاهش ضخامت.

به‌منظور بررسی خواص مکانیکی مواد مرکب تولید شده توسط فرایند نورد تجمّعی (استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نسبی)، آزمون کشش ورق‌ها در دمای اتاق و با سرعت حرکت فک‌های برابر با ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه توسط دستگاه کشش اینسترون انجام شد. نمونه‌های آزمون کشش به‌اندازه‌ی یک پنجم اندازه‌ی موجود در استاندارد JIS-5، ساخته شدند. میزان ازدیاد طول سنجه بعد از انجام آزمایش با نشانه‌گذاری بر روی نمونه‌ها به‌دست آمد.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر کیفیّت اتصال ایجاد شده در فصل مشترک و چگونگی شکست ورق‌های تولید شده، سطوح شکست نمونه‌های آزمون کشش در مراحل مختلف فرایند نورد تجمّعی با استفاده از میکروسکُپ الکترونی روبشی (Leica Cambridge S 360) بررسی شدند.

نتایج و بحث

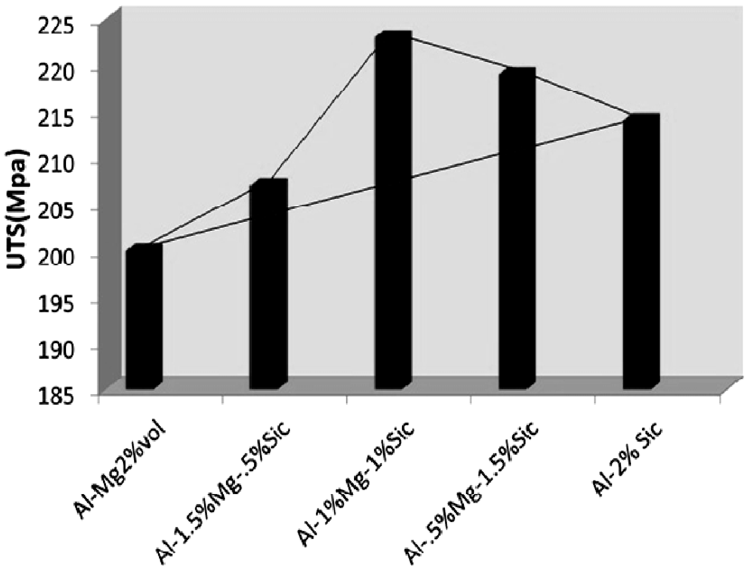
تغییرات استحکام کششی و انعطاف‌پذیری نمونه‌های مواد مرکب هیبریدی Al-Mg-SiC پس از گذر هشتم نورد، به‌ترتیب در شکل‌های (۳) و (٤) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، استحکام کششی و انعطاف‌پذیری نمونه‌های ماده‌ی مرکب بیش‌تر از Al-Mg و Al-SiC به‌ازای درصدهای حجمی مشابه می‌باشد. این نشان‌دهنده‌ی وقوع پدیده‌ی تشدید اثر متقابل (Synergistic Effect) مطلوب به‌دلیل استفاده‌ی هم‌زمان از پودرهای منیزیم و SiC در مواد مرکب هیبریدی است [7].

در حقیقت، برای پیش‌بینی خواص مکانیکی مواد مرکب در یک مجموعه‌ی هیبریدی مانند زمینه‌ی آلومینیم تقویت شده با ذرات A و B، می‌توان از قانون مخلوط‌ها بهره گرفت [7]:

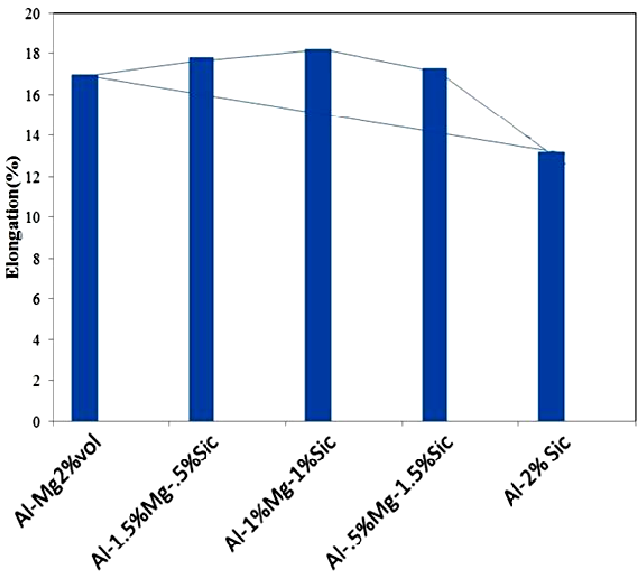
$$P_H = P_A V_A + P_B V_B \qquad (۱)$$

که در آن، P_H خاصیّت مکانیکی ماده‌ی مرکب هیبریدی، P_A خاصیّت مکانیکی مجموعه‌ی اوّل (مانند ماده‌ی مرکب Al-A)، P_B خاصیّت مکانیکی مجموعه‌ی دوّم (مانند ماده‌ی مرکب Al-B)، V_A و V_B به‌ترتیب کسر حجمی مجموعه‌ی اوّل و دوّم می‌باشد ($V_A+V_B=$ ۱). اثر هیبریدی مطلوب یا نامطلوب به‌صورت انحراف مثبت یا منفی از قانون مخلوط‌ها تعریف می‌شود. به این رفتار، تشدید اثر متقابل مطلوب یا نامطلوب گفته می‌شود (شکل ۵)[7,8]. در میان نتایج

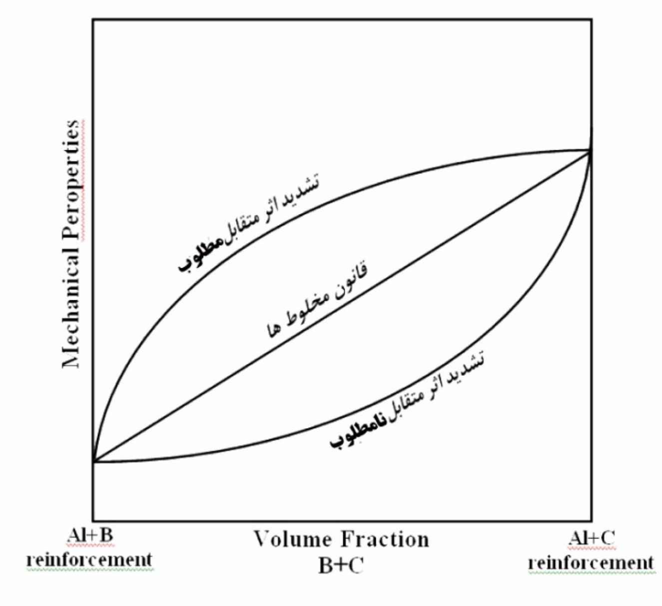
این تحقیق، ترکیب Al -۱Vol.%Mg-۱Vol.%SiC دارای بیش‌ترین استحکام و انعطاف‌پذیری می‌باشد. استحکام کششی ماده‌ی مرکب Al -۱Vol.%Mg-۱Vol.%SiC برابر با MPa ۲۲۳ می‌باشد که حدود ٤.۵۳ برابر بیش‌تر از ورق‌های آلومینیم تاب‌کاری شده است.



شکل۳ نمودار تغییرات استحکام کششی مواد مرکب هیبریدی Al-Mg –SiC پس از گذر هشتم از فرایند نورد تجمّعی



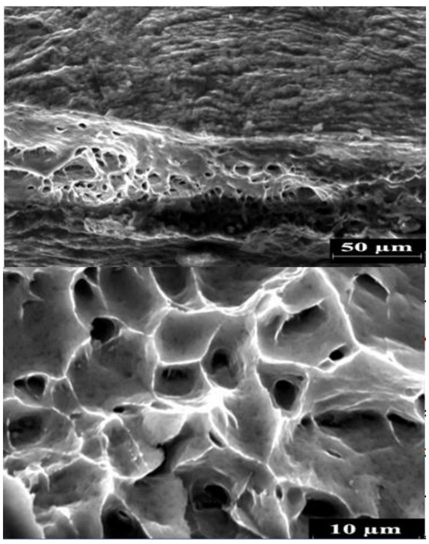
شکل ٤ نمودار تغییرات انعطاف‌پذیری مواد مرکب Al-Mg-SiC پس از گذر هشتم از فرایند نورد تجمّعی



شکل ۵ رفتار تشدید اثر متقابل مطلوب و نامطلوب در مواد مرکب هیبریدی [7].

به‌منظور بررسی کامل‌تر شرایط اتصال ایجاد شده در فصل مشترک و چگونگی شکست ورق‌های تولیدی در فرایند نورد تجمّعی، سطوح شکست نمونه‌های آزمون کشش پس از مرحله‌ی هشتم فرایند با استفاده از میکروسکُپ الکترونی روبشی ارزیابی شدند (شکل‌های (٦) و (٧)). همان‌گونه که در شکل (٦) مشاهده می‌شود، سطح شکست آلومینیم تاب‌کاری شده از نوع شکست نرم همراه با فرورفتگی‌های (dimples) عمیق و هم‌محور و مناطق برشی هستند. به‌طور کلی، سطح شکست ماده در شکست نرم به‌صورت الیافی و خاکستری رنگ همراه با فرورفتگی‌هایی به‌شکل هم‌محور یا بیضی شکل تشخیص داده می‌شوند. بیان شده است که شکل فرورفتگی‌ها به نحوه‌ی اعمال نیرو و چگونگی گسترش ریزحفره‌های به‌هم پیوسته بستگی دارد [9].

افزون بر این، در شکل (٧) مشاهده می‌شود که بعد از فرایند نورد تجمّعی، نمونه‌های ماده‌ی مرکب همانند ورق‌های آلومینیم تاب‌کاری شده، دارای ظاهر شکست نرم همراه با فرورفتگی‌ها و مناطق برشی هستند. این نوع شکست در موادی که تحت فرایند تغییر شکل موم‌سان شدید قرار گرفته‌اند نیز گزارش شده است [10].

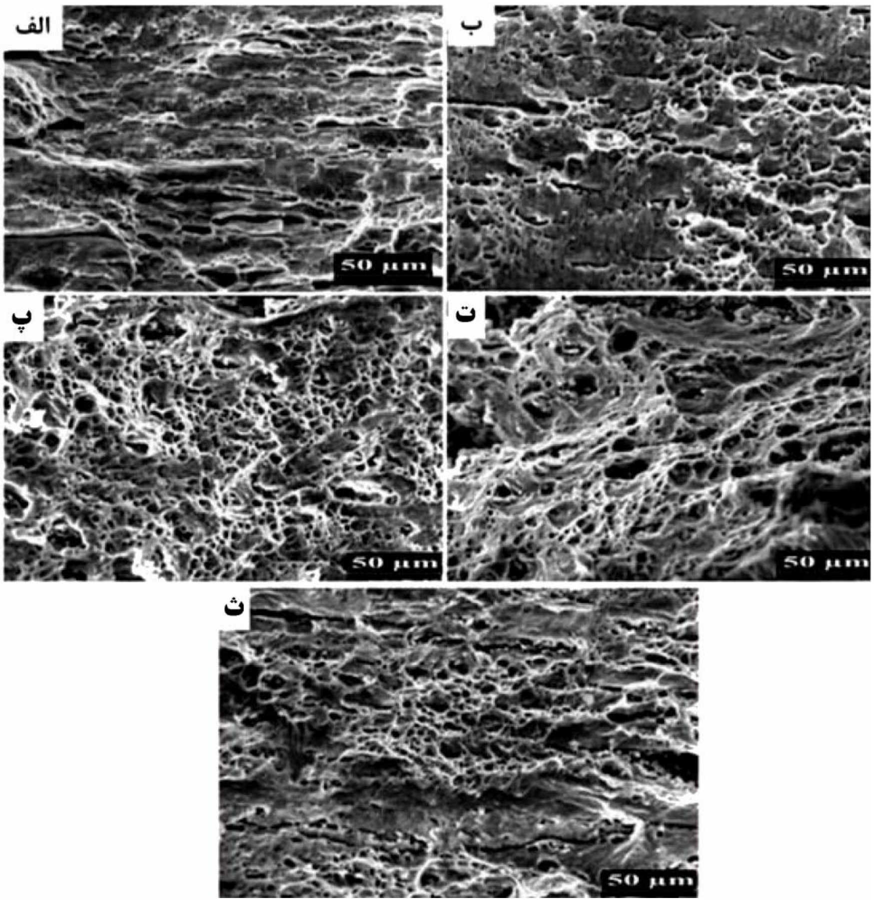


شکل ٦ تصویر SEM از سطح شکست آلومینیم تاب‌کاری شده با بزرگ‌نمایی‌های مختلف.

شکست در این حالت‌ها، به‌دلیل به‌هم پیوستن ریزحفره‌ها و جاهای خالی به‌یک‌دیگر در جلوی ترک

و فعالیّت‌های محدود نابجایی‌ها می‌باشد [9]. به‌طور کلی، دو نوع سازوکار شکست نرم وجود دارد. نوع اوّل از رشد و به‌هم پیوستن حفره‌ها و سازوکار دوّم از برش پیوندهای حفره‌های داخلی ناشی می‌شود. این دو سازوکار در شرایط مختلف یا با یک‌دیگر همراه می‌شوند و یا با هم رقابت می‌کنند.

در حضور تنش برشی، سازوکار تجمّع برش منجر به تشکیل فرورفتگی‌های کشیده و کوچک می‌شود. به‌این ترتیب، شکست نمونه‌های نورد تجمّعی شده از نوع شکست نرم برشی است که علامت مشخصّه‌ی آن، فرورفتگی‌های کم عمق و کشیده می‌باشد. در این نوع شکست، برش درونی بین حفره‌ای اتفاق می‌افتد که منجر به شکست می‌شود. این نوع شکست، در مواد مرکب Al-SiC در تحقیق رضایت و همکارانش، [11]، و $Al\text{-}Al_2O_3$ در تحقیق جماعتی و همکارانش نیز گزارش شده است [12]. افزون بر این، همان‌طور که در شکل (۷- ب، پ و ت) مشاهده می‌شود، تعداد مناطق برشی به‌علّت حضور هم‌زمان فلز منیزیم و SiC نسبت به شکل‌های (الف و ث) بیش‌تر است.



شکل ۷ تصویرهای SEM از سطح شکست مواد مرکب هیبریدی پس از مرحله‌ی هشتم فرایند نورد تجمّعی؛
(الف) Al-2Vol.% Mg، (ب) Al-1.5Vol.%Mg-0.5Vol.%SiC ،
(پ) Al-1Vol.%Mg-1Vol.%SiC ، (ت) Al-0.5Vol.%Mg-1.5Vol.%SiC (ث) Al-2Vol.%SiC

نتیجه‌گیری

۱- به‌دلیل حضور ذرات فلز Mg و SiC، رفتار مطلوب تشـدید اثـر متقابـل در مـاده‌ی مرکـب Al-Mg-SiC مشاهده شد.

۲- با افزودن مخلوط ذرات Mg و SiC، انعطاف‌پذیری و استحکام ماده‌ی مرکب به‌طور هم‌زمان افزایش یافت.

۳- استحکام و انعطاف‌پذیری بهینـه در مـاده‌ی مرکـب Al-۱Vol.%Mg-۱Vol.%SiC و به‌ترتیب برابر با MPa ۲۲۳ و ۱۸/۳ درصد به‌دست آمد.

٤- اسـتحکام کششـی مـاده‌ی مرکـب Al-۱Vol.%Mg-۱Vol.%SiC بـه‌میـزان ٤/۵۳ برابـر آلومینیم تاب‌کاری شده به‌دست آمد.

۵- بررسی سطوح شکست مواد مرکب هیبریـدی Al-Mg-SiC پـس از آزمـون کشـش، بـا اسـتفاده از میکروسکُپ الکترونی روبشی بیان‌گـر وقـوع شکسـت نرم از نوع برشی بود. افزون بر این، تعداد مناطق برشی به‌علّت حضور هم‌زمان ذرات Mg و SiC افزایش یافته بود.

مراجع

۱. زبرجد، م.، خدیوی آیسک، ح.، ساسانی، ن.، وحید کریمی، ا.، "مقدمه‌ای بر مواد پیشرفته" یوکابد، (۱۳۸۸).

2. Kamat, SV., Hirth, JP and Mehrabian ,R ., "Mechanical properties of particulate reinforced aluminum-matrix composite". Acta metall VOL.37,pp.2395-2402 .(1989).

3. Kok, M., "Production and mechanical properties of Al_2O_3 particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites", Journal of materials processing technology ,VOL.161, pp.381-387, (2005).

4. Murday,James S., " the coming revolution-Science and technology of nanoscale structures" , The Ampitac Newsletter, VOL.6, pp.1-10, (2002).

5. Valiev,R.Z., Islamgaliev, R.K.,and Alexandrov, I.V., "Bulk Nanostructured Materials from severe plastic deformation" Progress in Materials Science 45, pp.103-189,(2000).

٦. خلخالی، م. ، "تولید فوم و کامپوزیت زمینه فلزی به وسیله فرایند اتصال نوردی انباشتی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۸۷).

7. Himani Joshi., Purnima,J. "Development of glass fiber, wollastonite reinforced polypropylene hybridcomposite: Mechanical properties and morphology" Materials Science and Engineering A,VOL. 527 ,pp1946–1951, (2010).

.8. Mohana,R.,Kishore "Compressive strength of Jute-glass hybrid fiber composites", Material Science Letters 2, pp 99-102, (1983).

9. Hasnaoui,A.,VanSwygenhoven,H., Derlet,P.M " Dimples on nanocrystaline fracture Surfaces as evidence for Shear plane Formation "Science ,VOL.300,pp1550-1552. .,(2003)

10. Eizadjou,M., Danesh Manesh,H., Janghorban,K., "Microstructure and mechanical properties of ultra-fine grains (UFGs) aluminum strips produced by ARB process". Journal of Alloys and Compounds,VOL.474,pp.406-415, (2009).

11. Rezayat, M., Akbarzadeh,A., Owhadi, A., " Production of high strength Al–Al2O3 composite by accumulative roll bonding" ,composites.part A, VOL.43, pp.261-267, (2012).

12. Jamaati, R., Toroghinejad, M.R., "Manufacturing of high-strength aluminum/alumina composite by accumulative roll bonding " Materials science and engineering A, VOL.527, pp.4146-4151, (2010).